

## РАЗРАБОТКА КИНЕТИЧЕСКОГО НАКОПИТЕЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ С МАГНИТНОЙ КОМПЕНСАЦИЕЙ

И. Л. ВАСИЛЬЕВ<sup>1</sup>, В. Г. СЫЧЕНКО<sup>2\*</sup>, М. Е. ПАВЛИЧЕНКО<sup>1</sup>, С. В. АРПУЛЬ<sup>1</sup>,  
А. А. ДАНИЛОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Уральский государственный университет путей сообщения, г. Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup> кафедра интеллектуальных систем электроснабжения, Днепрпетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, Днепр, Украина

\*e-mail: [elpostz@i.ua](mailto:elpostz@i.ua)

**АННОТАЦИЯ.** Рассмотрены оптимальные параметры компактного кинетического накопителя электрической энергии, позволяющие охватить наиболее широкий круг потребителей автономных солнечных электростанций. Оценены объемы рынка потребителей. Проведена сравнительная характеристика различных типов накопителей электрической энергии. Указаны достоинства и недостатки каждого из существующих видов накопителей. Дана стоимостная характеристика одного зарядо-разрядного цикла электрохимических накопителей. Показано совместное применение накопителей кинетической и электрической энергии в структуре гибридного накопителя с целью оптимизации стоимостных затрат на производство электрической энергии от альтернативных источников электрической энергии. В этом случае, компенсация высокочастотных пульсаций напряжения осуществляется за счет энергии, предварительно запасенной в кинетическом накопителе. Рассмотрены технические проблемы, возникающие при использовании накопителей кинетической энергии (маховиков). К ним относят наличие гироскопического эффекта, не позволяющего мобильное исполнение накопителя, а также специальные требования к материалу, из которого изготавливается маховик. Рассмотрены возможные особенности конструктивного исполнения накопителей на основе маховиков. Использование магнитной компенсации центробежных сил маховика позволяет отказаться от использования высокопрочных и дорогостоящих материалов.

**Ключевые слова:** накопитель энергии, кольцевой маховик, супермаховик, солнечная электростанция, автономная система электроснабжения.

## DEVELOPMENT OF A KINETIC ELECTRIC ENERGY DRIVE WITH MAGNETIC COMPENSATION

I. VASILIEV<sup>1</sup>, V. SYCHENKO<sup>2</sup>, M. PAVLICHENKO<sup>1</sup>, S. ARPUL<sup>1</sup>, A. DANYLOV<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Ural State University of Railway Engineering, Ekaterinburg, Russia

<sup>2</sup> Intelligent Power Supply Systems department, Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Dnipro, Ukraine

**ABSTRACT.** The optimal parameters of a compact kinetic energy storage device are considered, which allow to cover the widest range of consumers of autonomous solar power plants. Estimated consumer market volumes. A comparative characteristic of various types of electrical energy storage devices is carried out. The advantages and disadvantages of each of the existing types of drives are indicated. The cost characteristic of one charge-discharge cycle of electrochemical storage devices is given. The combined use of kinetic and electric energy storage devices in the structure of a hybrid storage device is shown with the aim of optimizing the cost of generating electric energy from alternative sources of electric energy. In this case, the compensation of high-frequency voltage ripples is carried out due to the energy previously stored in the kinetic storage device. Technical problems arising when using kinetic energy storage devices (flywheels) are considered. These include the presence of a gyroscopic effect that does not allow mobile performance of the drive, as well as special requirements for the material from which the flywheel is made. Possible features of the design of flywheel-based drives are considered. The use of magnetic compensation of the centrifugal forces of the flywheel eliminates the use of high-strength and expensive materials.

**Keywords:** energy storage; ring flywheel; super flywheel; solar power station; autonomous power supply system.

### Введение

По оценкам консалтинговой компании McKinsey Energy Insights, возобновляемые источники энергии (ВИЭ) будут вырабатывать более 50% электроэнергии уже к 2035 году [1]. При этом, по данным Управления информации по энергетике при Министерстве энергетики США на 2015 год, капитальные расходы атомных электростанций (АЭС) составляют

\$5530 на кВт мощности – тогда как аналогичный показатель для наземных ветростанций составляет \$2200 на кВт мощности, а для фотоэлектрической солнечной – около \$4000 на кВт. С тех пор стоимость солнечных панелей снизилась в несколько раз и сейчас производители предлагают панели по цене 0,19 \$ за 1 Вт (FOB).

В 2019 году стоимость реализации проекта строительства сетевой солнечной электростанции «под ключ» в Украине составляет от 0,8 до 1\$ за 1 Вт установленной мощности [2].

Отметим, что разница в цене производимой энергии отличается на порядок, при этом, с развитием технологий, панели продолжают дешеветь. Для доставки произведенной на АЭС электроэнергии потребителю при централизованном электроснабжении необходимы ЛЭП с повышающими и понижающими трансформаторами, что увеличивает стоимость сгенерированной энергии в 2-3 раза. Сетевая составляющая в цене на электроэнергию для потребителей составляет от 30 до 60%, в зависимости от множества факторов.

Генерация электроэнергии с применением солнечных панелей может производиться непосредственно у потребителя, но при этом в автономных системах электроснабжения (АСЭС) необходимо использовать аккумуляцию, что увеличивает стоимость электроэнергии в 4-5 раз [75% от стоимости АСЭС занимают аккумуляторы]. На данный момент обе схемы электроснабжения – централизованно произведенной электроэнергией или автономной солнечной, конкурируют друг с другом, и по цене, и по качеству, и по надежности. Возникает вопрос – насколько экономически и технически обоснованно присоединение потребителя к большой системе и надо ли для электроснабжения малоомощного удаленного потребителя «гонять электроны» от больших генерирующих установок [3].

Одной из главных причин, сдерживающей развитие производства экологически чистой солнечной энергии – является проблема сохранения (накопления) произведенной электроэнергии при отсутствии спроса. На основании опыта эксплуатации автономных солнечных электростанций можно утверждать, что снизить стоимость накопления энергии в микросистеме электроснабжения можно двумя путями – или объединением автономных электростанций в одну сеть, или разработкой недорогого малогабаритного накопителя энергии.

Объединение нескольких АСЭС в одну микросеть позволяет снизить стоимость накопителей энергии на 40 %. При этом возникают технические сложности с учетом энергии каждым из участников сети, так как стоимость электроэнергии, полученной от солнца, зависит от степени освещенности, времени суток, объема накопленной энергии, то есть от спроса и предложения, и может значительно изменяться много раз в течение дня, вплоть до отрицательных значений. Наиболее предпочтительным для учета электроэнергии в сети при наличии множества генерирующих и потребляющих устройств можно считать технологии распределенного реестра, но, как правило, они работают только при наличии сети Интернет.

Второй способ снижения доли стоимости накопителей в АСЭС, позволяющий в разы уменьшить долю стоимости накопления в конечной цене для по-

требителя – создание недорогих, компактных, с большим ресурсом, накопителей энергии.

Целью этой работы является разработка конструкции накопителя энергии, который бы мог существенно снизить расходы потребителя автономной электростанции.

### Состояние проблемы

В настоящее время наибольшее распространение получили несколько типов химических аккумуляторов. Общими недостатками химических аккумуляторов является ограниченный ресурс, узкий температурный диапазон, высокая стоимость цикла заряд-разряд. Некоторые типы аккумуляторов требуют сложных зарядных устройств [4].

Наибольшее распространение в АСЭС на сегодня получили тяговые свинцово-кислотные аккумуляторы, выполненные по технологии AGM. Срок службы при полной автономии составляет до 3-х лет, при резервном питании – до 10 лет. Количество циклов при 30% разряде – от 900 до 1400. Цена за 1 цикл 30% разряда, для приведенной емкости  $400\text{А}\cdot\text{ч} \cdot 24\text{В}$  варьируется от 0,6 до 1 евро.

Кислотные герметизированные по гелевой технологии при полной автономии служат до 4-х лет, при резервном питании – до 12. Количество циклов при 30% разряде – от 1000 до 5700. Цена за 1 цикл 30% разряда, для приведенной емкости  $400\text{А}\cdot\text{ч} \cdot 24\text{В}$  варьируется от 0,58 до 1,1 евро.

Тяговые кислотные панцирные обслуживаемые аккумуляторные батареи служат при полной автономии не менее 10 лет, при резервном питании – 15-17 лет, при условии использования особо чистого электролита и при наличии пробок рекомбинации водорода. Без пробок рекомбинации водорода выдерживают от 2000 до 3800 30% циклов, стоимость цикла – от 0,19 до 0,53 евро. При использовании пробок рекомбинации количество 30% циклов – 3800, стоимость цикла – от 0,21 до 0,29 евро.

Самыми неподходящими для хранения энергии в АСЭС являются стартерные аккумуляторы. Количество 30% циклов – от 350 до 3000, стоимость цикла – от 0,68 до 1,01 евро.

При увеличении глубины разряда количество циклов существенно снижается, при этом значительно возрастает стоимость цикла. Например, наиболее распространенная модель свинцово-кислотного AGM аккумулятора при 30% разряде служит 1200 циклов, при 50% разряде число циклов сокращается до 500, а при 80% разряде устройство служит 250 циклов. Соответственно, возрастает стоимость цикла.

К достоинствам свинцово-кислотных аккумуляторов можно отнести их морозостойкость, но только в заряженном состоянии, простоту зарядных устройств. Для негерметизированных батарей требуется проветривание помещений. Плотность запасаемой энергии (энергоемкость) составляет 10-40 Вт\*ч/кг массы. Наибольшее распространение сегодня в АСЭС

имеют аккумуляторы емкость 100 А\*ч с номинальным напряжением 12 В.

Аккумуляторы нового поколения, литий-железофосфатные, обладают повышенной плотностью энергии – 240 Вт\*ч/кг. Служат 7000 циклов при 30% разряде, стоимость такого цикла – от 0,41 до 0,7 евро. Срок службы при полной автономии – 20 лет, в резервном режиме – 25-30 лет. Требуется сложное зарядное устройство. Ключевой недостаток – зарядка при отрицательных температурах выводит батарею из строя. Именно это недостаток препятствует широкому распространению технологии [4].

Все параметры аккумуляторов приводятся при температуре окружающей среды (или электролита) +20°C. Увеличение или уменьшение температуры приводит к значительному изменению параметров.

Накопители на конденсаторах из-за относительно большого тока саморазряда не могут хранить энергию в требуемых для АСЭС временных промежутках. Суперконденсаторы (ионисторы) имеют слишком низкое значение рабочего напряжения.

#### **Кинетические накопители электрической энергии**

Кинетические накопители энергии известны очень давно. Последние десятилетия было создано множество конструкций кинетически – маховиков и супермаховиков [5]. Долгое время маховики пытались установить на движущийся транспорт, работающий в режиме разгон-торможение, но из-за гироскопического эффекта они так и не прижились. В настоящее время появился и растет рынок стационарных накопителей энергии, которым не требуется перемещение в пространстве. Возможно, что маховики могут найти значительное место на этом рынке. Существуют разные конструкции маховиков. Современные конструкции, выполненные из композитных материалов, обладают энергоемкостью 300 Вт\*ч/кг, служат более 20 лет, обладают большим рабочим температурным диапазоном [6]. Теоретическая предельная энергоемкость супермаховика составляет 4000 Вт\*ч/кг. Важным преимуществом маховика является то, что в нем не выражены процессы старения, как в химических аккумуляторах.

У маховика есть ряд недостатков. Самый главный – гироскопический эффект, не позволяющий перемещать раскрученный маховик в пространстве. Недостатком так же является проявление резонанса при определенной скорости вращения. Поэтому при конструировании маховика необходимо избегать явления резонанса. Один из примеров маховика – центрифуги обладающие подкритической скоростью вращения до 90 000 об/мин. При разгоне маховик проходит через последовательную серию критических оборотов, подобно гармоникам при переменном токе, что является проблемой при частом разгоне и торможении. Для длительного вращения маховика необходимо иметь сложную систему подвеса и достаточно глубокий вакуум, что удорожает конструкцию. В существующих

конструкциях через 2 часа работы маховика остается не более 70% энергии.

Второй недостаток маховиков – необходимость использовать высокопрочные материалы для тела маховика. Для разных конструкций использовались легированная сталь, алюминиевые, титановые и вольфрамовые сплавы, композиты – бороалюминий, углеалюминий, углепластики, органопластики [7]. Естественно, что чем прочнее материал, тем он дороже. Следовательно, прочность материала маховика является ограничивающим параметром его энергоемкости. Существуют способы преодоления этого ограничения. Из истории бетона известно, что для борьбы его недостаточной прочностью на разрыв его стали армировать, а потом и предварительно напрягать арматуру. Если предварительно сжать маховик, то можно ожидать что выдержит большую нагрузку, чем несжатый, и такую продукцию – маховик из предварительно сжатого железобетона предлагает французская компания ENERGIESTRO [8].

Существует и другой способ увеличить энергоемкость маховика без использования высокопрочных дорогостоящих материалов. Для этого на внешний край маховика и на внутреннюю поверхность корпуса особым образом установлены магниты, которые не только предварительно сжимают сам маховик, но и компенсируют центробежные силы, появляющиеся при вращении.

Данная конструкция использует сильнодействующие постоянные магниты и напоминает поезд на магнитном подвесе, который движется по пути, свернутому в кольцо. На данном этапе в поисках оптимальных параметров конструкции создан компактный маховик высотой 50 мм и диаметром 140. В данной конструкции предусмотрена стабилизация вращения маховика магнитным полем при его вращении при больших оборотах. При остановке и при малых оборотах маховик удерживается с помощью обычных подшипников, режим «парковки». Вращение задается бесколлекторным двигателем постоянного тока мощностью 200 Вт, который раскручивает маховик, а затем, с помощью системы управления, переходит в режим генератора. Маховик имеет ряд ключевых параметров и характеристик, от согласованной работы которых будет зависеть надежность работы и срок службы устройства. Это масса, физические размеры, скорость вращения, наличие или отсутствие вакуума, электрические характеристики. Иногда они противоречат друг другу. При большой массе маховика требуется большой пусковой момент, что может противоречить максимальному количеству оборотов. Излишнее вакуумирование, кроме увеличения цены и снижения потерь, может вызвать проблемы с охлаждением. Цель проекта – создать оптимальную конструкцию по критерию минимума цены цикла (рис. 1).



Рис. 1 – Компактный кинетический накопитель энергии. Версия 5.1

Кинетические накопители обладают очень низкой ценой цикла, и максимальный эффект можно ожидать от их совместного использования с распространенными химическими накопителями.

Основное назначение маховика – питание коротких (секунды и минуты) пиков потребления, экономия дорогостоящих циклов химического аккумулятора, а длительные, но маломощные режимы потребления будут снабжаться от аккумуляторов.

За счет огромного ресурса маховика можно ожидать существенное снижение стоимости цикла заряд-разряд.

#### Кинетический накопитель с магнитной компенсацией

Из рассмотренного выше следует, что необходимо оптимизировать конструкцию компактного кинетического накопителя по критерию минимума стоимости хранения электроэнергии массой до 20 кг и емкостью до 0,2 кВт\*ч, для совместной работы со свинцово-кислотным аккумулятором емкостью 100 А\*ч.

В настоящее время известны несколько существующих конструкций и несколько проектов по созданию кинетических накопителей.

Накопители НКЭ-3 и НКЭ-6 от компании «Русский сверхпроводник» [9] имеют массу 2000 кг и 3000 кг соответственно, содержат маховик, разгоняемый до 4000 об/мин. Преимуществом данных конструкций является отработанная технология производства, но массогабаритные параметры не позволяют этим конструкциям выйти на широкий рынок. Для промышленности они маломощны, для малых АСЭС – очень мощны. Эти накопители могут найти применение, как вольтодобавка на железнодорожном транспорте для организации пропуска скоростных поездов и при организации микросетей в удаленных и изолированных объектах электроснабжения. Известна конструкция израильского стартапа «ChakraTес» разрабатываемая

для станций зарядки электромобилей, имеет массу 250 кг и емкость 3 кВт\*ч [10].

Есть и множество других конструкций и разработок, которые пытаются найти свое место в системах хранения энергии. В последние годы рынок растёт колоссальными темпами, отмечает Wood Mackenzie. В 2018 году было построено 3,3 ГВт/6 ГВт\*ч, объемы выросли на 140% по сравнению с 2017 годом. Ожидается, что глобальный рынок систем хранения энергии до 2024 года вырастет в 13 раз. [11]. Как правило, все разработки имеют свои конструктивные особенности, и, учитывая практически взрывообразное развитие рынка, каждая конструкция найдет свою нишу и своего покупателя. Есть основания полагать, что свою нишу займет компактный накопитель, предназначенный для тех 13% земель, которые на сегодня не имеют доступа к электричеству.

Разработанный накопитель имеет следующие параметры – номинальное напряжение 12 В постоянного тока, достигнутая скорость вращения – 7285 оборотов в минуту, достигнута плотность 0,2 Вт\*ч/кг массы накопителя. Стенд для испытаний позволяет испытывать образцы со скоростью до 21791 об/мин. Достигнута скорость на ободе маховика 137 км/ч, у аналогичных устройств скорость на ободе составляет 800 км/ч, мировой рекорд – 5028 км/ч. Даже при такой плотности энергии конструкция позволяет составлять конкуренцию свинцово-кислотным аккумуляторам. Особенностью конструкции является магнитный подвес не оси маховика, а всего тела маховика.

Рассмотрим объем энергии, который может быть принят и отдан свинцово-кислотным аккумулятором с технологией AGM емкостью 100 А\*ч на протяжении всего жизненного цикла. Срок службы такого аккумулятора составляет 400 циклов при температуре +25 °С. Изменение температуры в одну или другую сторону не увеличивает срок жизни устройства. С учетом погрешностей можно считать, что за свой жизненный цикл такой аккумулятор сможет переработать 1,2 кВт\*ч \* 400 циклов = 480 кВт\*ч при стоимости устройства порядка 200\$. Таким образом, стоимость хранения 1 кВт\*ч электроэнергии можно оценить в 0,42 \$/кВт\*ч. Если принять, что время зарядки составляет 6 часов, а время разрядки – 2 часа, то при непрерывном режиме эксплуатации аккумулятор прослужит 3200 часов.

Произведем подобные расчеты для условного маховичного накопителя. Предположим, что время заряда составляет 0,5 часа, разряд – 0,5 часа. Цикл составляет 1 час. Условная цена – те же 200\$. Оценим запасаемую энергию в 0,1 кВт\*ч. Срок службы 20 лет, что соответствует 175200 циклов или 17520 кВт\*ч. Стоимость хранения 0,011\$/кВт\*ч. Даже с учетом всех допущений получается, что кинетической накопитель позволяет хранить энергию в 36 раз выгоднее, чем свинцово-кислотный аккумулятор.

У кинетических накопителей есть полезное свойство – возможность выдавать значительную мощ-

ность, хотя и кратковременно. Недостатком кинетических накопителей является, кроме гироскопического эффекта, недостаточно долгое хранение энергии без применения вакуумирования.

На данном этапе наиболее перспективным видится объединение полезных потребительских свойств свинцово-кислотных аккумуляторов и кинетических накопителей.

### Мировой рынок

13% населения Земли – это порядка одного миллиарда человек – не имеют доступа к электричеству. В основном, это жители стран Африки, а также Центральной и Южной Азии. Как отмечается в докладе Всемирного банка, почти 87% населения земного шара, не имеющего доступа к электричеству, живут в сельской местности.

В то же время в докладе говорится, что с 2010 года темпы роста числа людей, получающих доступ к электроэнергии, заметно увеличились. И, если такая тенденция сохранится, то в 2030 году, по оценкам специалистов, доступа к электричеству не будут иметь «лишь» 674 млн человек [12]. С учетом того, что стоимость электрификации маломощных удаленных потребителей с помощью технологии солнечного электроснабжения уже сейчас ниже, чем электрификация централизованной электросетью, можно считать, что миру понадобится большое количество компактных кинетических накопителей электрической энергии с магнитной компенсацией.

В процессе эксплуатации автономных солнечных электростанций эмпирически сложилось соотношение между мощностью панелей и емкостью аккумуляторов. В зависимости от региона и от режима эксплуатации АСЭС на каждые 100 А\*ч свинцово-кислотного аккумулятора должно приходиться от 100 до 200 Вт мощности солнечных панелей. Таким образом, можно считать, рынок аккумуляторов для АСЭС составляет сотни тысяч и миллионы свинцово-кислотных аккумуляторов емкостью 100 А\*ч.

### Выводы

1. Компактный накопитель кинетической энергии при объединении со свинцово-кислотным аккумулятором позволяет более экономно хранить электроэнергию, увеличить срок службы химического аккумулятора.

2. Использование магнитной компенсации центробежных сил маховика позволяет отказаться от использования высокопрочных и дорогостоящих материалов.

3. Наибольший эффект от использования кинетических накопителей энергии можно ожидать при энергоснабжении объектов, имеющих кратковременные высокие пиковые значения потребляемой мощности – тяговые подстанции, питание устройств автоматики и телемеханики, приводы различных устройств.

### Список литературы

1. Прогноз развития мирового энергетического сектора. McKinsey Energy Insights. <https://clck.ru/GMP2M>
2. Промышленная солнечная электростанция 1 МВт. <https://alteco.in.ua/solution/promyshlennyye-solnechnyye-elektrostantsii/solar-plant-1mw>
3. **Сыченко, В.** «Повышение энергетической эффективности в эволюционирующих системах электроснабжения», В. Г. Сыченко [и др.] // *Вестник Национального технического университета "Харьковский политехнический институт"*: [сб. науч. тр.]. – Харьков, 2017. – Вып. 27 (1249) : Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. Силовая электроника и энергоэффективность: темат. вып. – С. 177-181.
4. Выбор и эксплуатация аккумуляторов для автономного и резервного электроснабжения 2014. <http://www.invertor.ru/akb.html>
5. **Гулия, Н. В.** «Накопители энергии» - М.: Наука, 1980.
6. **Соколов, М. Томасов, В., Jastrzebski, R.P.** "Сравнительный анализ систем запасаения энергии определение оптимальных областей применения современных супермаховиков» *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2014, №4 (92).
7. Материалы для маховика. <https://libtime.ru/science/material-dlya-mahovika.html>
8. Экологическое и устойчивое хранение энергии. <http://www.energiestro.net/>
9. Применение кинетического накопителя энергии серии КНЭ. Корпорация «Русский сверхпроводник». <https://clck.ru/GMP7w>
10. Стартап «ChakraTec». <https://www.chakratec.com/>
11. Статистика развертывания систем хранения энергии в мире и прогноз развития рынка до 2024 года. Wood Mackenzie. <https://clck.ru/GMPEA>
12. 13% населения Земли живут без электричества. <https://newizv.ru/news/society/02-05-2018/13-naseleniya-zemli-zhivut-bez-elektrichestva>

### References (transliterated)

1. Prognoz razvitiya mirovogo energeticheskogo sektora. McKinsey Energy Insights. <https://clck.ru/GMP2M>
2. Promyshlennaya solnechnaya elektrostaniya 1 MVt. <https://alteco.in.ua/solution/promyshlennyye-solnechnyye-elektrostantsii/solar-plant-1mw>
3. **Sychenko, V.** «Povyshenie energeticheskoy effektivnosti v evolyucioniruyushih sistemah elektrosnabzheniya», V. G. Sychenko [i dr.] // *Vestnik Nacionalnogo tehniceskogo universiteta "Harkovskij politehniceskij institut"*: [sb. nauch. tr.]. – Harkov, 2017. – Vyp. 27 (1249) : Problemy avtomatizirovannogo elektroprivoda. Teoriya i praktika. Si-lovaya elektronika i energoefektivnost: temat. vyp. – S. 177-181.
4. Vybory i ekspluatatsiya akkumulyatorov dlya avtonomnogo i rezervnogo elektrosnabzheniya 2014. <http://www.invertor.ru/akb.html>
5. **Gulia, N. V.** «Nakopiteli energii» — М.: Nauka, 1980.
6. **Sokolov, M. Tomasov, V., Jastrzebski, R.P.** "Sravnitelnyj analiz sistem zapasaniya energii opredelenie optimalnyh oblastej primeneniya sovremennyh supermahovikov» *Nauchno-tehnicheskij vestnik informacionnyh tehnologij, mehaniki i optiki*. 2014, №4 (92).
7. Materialy dlya mahovika. <https://libtime.ru/science/material-dlya-mahovika.html>

- 8 Ekologicheskoe i ustojchivoe hranenie energii. <http://www.energiestro.net/>
- 9 Primenenie kineticheskogo nakopitelya energii serii KNE. Korporaciya «Russkij sverhprovodnik». <https://clck.ru/GMP7w>
- 10 Startap «ChakraTec». <https://www.chakratec.com/>
- 11 Statistika razvertyvaniya sistem hraneniya energii v mire i prognoz razvitiya rynka do 2024 goda. Wood Mackenzie. <https://clck.ru/GMPEA>
- 12 13% naseleniya Zemli zhivut bez elektrichestva. <https://newizv.ru/news/society/02-05-2018/13-naseleniya-zemli-zhivut-bez-elektrichestva>

### Сведения об авторах (About authors)

**Васильев Игорь Львович** – кандидат технических наук, доцент. Уральский государственный университет путей сообщения, Россия; e-mail: [ddk2120@gmail.com](mailto:ddk2120@gmail.com).

**Ihor Vasilev** – Ph. D., Docent, Position, . Ural State University of Railway Engineering, Russia, [ddk2120@gmail.com](mailto:ddk2120@gmail.com)

**Сыченко Виктор Григорьевич** – доктор технических наук, профессор. Кафедра интеллектуальных систем электроснабжения, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна; e-mail: [elpostz@i.ua](mailto:elpostz@i.ua).

**Viktor Sychenko** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of intelligent power supply systems. Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician Lazaryan; e-mail: [elpostz@i.ua](mailto:elpostz@i.ua).

**Павличенко Михаил** – директор ООО «ДДК», Россия, г. Екатеринбург; e-mail: [ddk2120@gmail.com](mailto:ddk2120@gmail.com).

**Mikhail Pavlichenko** – Director of DDK LLC, Russia, Yekaterinburg; e-mail: [ddk2120@gmail.com](mailto:ddk2120@gmail.com).

**Арпуть Сергей Викторович** – кандидат технических наук, Кафедра «Электроподвижной состав железных дорог», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна; e-mail: [arpul@ukr.net](mailto:arpul@ukr.net).

**Serhii Arpul** – Candidate of Technical Sciences (PhD) Department of electrorolling stock of railways. Dneprovsk National University of Railway Transport named after academician Lazaryan; e-mail: [arpul@ukr.net](mailto:arpul@ukr.net).

**Данилов Алексей Анатольевич** – Днепропетровский Национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, старший преподаватель кафедры «Интеллектуальные системы электроснабжения»; Днепр, Украина; e-mail: [fduch@ua.fm](mailto:fduch@ua.fm).

**Oleksiy Danilov** – Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, senior lecturer of the department "Intelligent power supply systems"; e-mail: Dnipro, Ukraine.

*Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Васильев, И. Л.** Разработка кинетического накопителя электрической энергии с магнитной компенсацией / **И. Л. Васильев, В. Г. Сыченко, М. Павличенко, С. В. Арпуть, А. А. Данилов** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Электрические машины и электромеханическое преобразование энергии*. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 20 (1345). – С. 110-115. – doi:10.20998/2409-9295.2019.20.15.

*Please cite this article as:*

**Vasilev, I., Sychenko, V., Pavlichenko, M., Arpul, S., Danylov, A.** Development of a kinetic electric energy drive with magnetic compensation. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Electric machines and electromechanical energy conversion*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, **20** (1345), 110-115, doi:10.20998/2409-9295.2019.20.15.

*Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

**Васильєв, І.** Розробка кінетичного накопичувача електричної енергії з магнітною компенсацією / **І. Л. Васильєв, В. Г. Сиченко, М. Павліченко, С. В. Арпуть, О. А. Данилов** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії"*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 20 (1345). – С. 110-115. – doi:10.20998/2409-9295.2019.20.15.

**АНОТАЦІЯ.** Розглянуто оптимальні параметри компактного кінетичного накопичувача електричної енергії, що дозволяють охопити найбільш широке коло споживачів автономних сонячних електростанцій. Оцінені обсяги ринку споживачів. Проведена порівняльна характеристика різних типів накопичувачів електричної енергії. Вказані переваги і недоліки кожного з існуючих видів накопичувачів. Дана вартісна характеристика одного заряду-розрядної циклу електрохімічних накопичувачів. Показано спільне застосування накопичувачів кінетичної і електричної енергії в структурі гібридного накопичувача з метою оптимізації вартісних витрат на виробництво електричної енергії від альтернативних джерел електричної енергії. В цьому випадку, компенсація високочастотних пульсацій напруги здійснюється за рахунок енергії, попередньо збереженої в кінетичному накопичувачі. Розглянуто технічні проблеми, що виникають при використанні накопичувачів кінетичної енергії (маховиків). До них відносять наявність гіроскопічного ефекту, що не дозволяє мобільне виконання накопичувача, а також спеціальні вимоги до матеріалу, з якого виготовляється маховик. Розглянуто можливі особливості конструктивного виконання накопичувачів на основі маховиків. Використання магнітної компенсації відцентрових сил маховика дозволяє відмовитися від використання високоміцних і дорогих матеріалів.

**Ключові слова:** накопичувач енергії, кільцевий маховик, супермаховик, сонячна електростанція, автономна система електропостачання.

*Надійшла (received) 08.07.2019*